

Investigating the performance of back-to-back mechanically stabilized earth walls as railway embankments using physical and numerical modeling

Majid Yazdandoust^{1*}, Faezeh Daftari²

1. Assistant professor, Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran.
2. MS student, Department of Civil and Architecture Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Abstract

Back-to-back mechanically stabilized earth walls (BBMSEWs) are important derivative structures that are widely used for roadway ramps and bridge approaches. This type of MSE wall is typically used for railway embankments and consists of two opposing reinforced masses in a back-to-back configuration. The behavior of the BBMSEWs is significantly dependent on the horizontal distance between the opposing reinforced masses and reinforcement arrangement. Despite this dependence and the use of different types and arrangements of reinforcements in back-to-back MSE walls, the combined effect of these two factors on the performance of BBMSEWs, especially those used to support the railway tracks, remains unknown. Therefore, an extensive experimental and numerical investigation on 12 small-scale BBMSEW physical models reinforced by metal-strips and geogrid and 12 numerical ones reinforced by polymer strips and geotextile to assess the effect of reinforcement type, overlap length of the reinforcements and the position of the continuous reinforcements on the behavior of back-to-back MSE walls supporting railway tracks. Six reinforcement arrangements were chosen for reinforcing the wall models. The position of the continuous reinforcements was changed in the first three arrangements to evaluate the effect of connecting the two opposing walls at different points and overlap lengths of 0, 0.3H and 0.6H were used in the last three arrangements to assess the influence of the overlapping reinforcement length. The findings indicated that the reinforcement stiffness played a more prominent role in improving the bearing capacity than the pull-out capacity.

It was found that, although the use of extensible reinforcements increased the facing deformation and decreased the sleeper bearing capacity, it played an influential role in reducing the force mobilized in the reinforcements. The connection of two opposing walls with continuous reinforcements and the complete separation of them from each other were found to be the best and worst reinforcement arrangements, respectively, for improving the bearing capacity and reducing wall deformation in BBMSEWs. The respective use of these two arrangements mobilized the maximum and minimum forces in the reinforcements. Moreover, the creation of a proper connection between the opposing walls using continuous inextensible reinforcements or those with a sufficient overlap lengths were found to be efficient solutions to preventing the propagation of a failure plane across the back-to-back MSE walls.

Review History

Received: Jul 14, 2025

Revised: Sep 29, 2025

Accepted: Dec 10, 2025

Keywords

Back-to-back MSE walls

Railway embankments

Geosynthetics

Physical modeling

Numerical modeling

* Corresponding Author Email: M.yazdandoust@qom.ac.ir - ORCID: 0000-0003-4355-118X



Copyright © 2026, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بررسی عملکرد دیوارهای خاک مسلح پشت به پشت به عنوان بستر خطوط ریلی با استفاده از مدلسازی فیزیکی و عددی

مجید یزدان دوست^{*۱} (ORCID ID)، فائزه دفتری^۲

۱. استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

۲. دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و معماری، دانشگاه آزاد اسلامی-واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، ایران.

چکیده

تاریخچه داوری

امروزه دیوارهای خاک مسلح پشت به پشت به عنوان راه دسترسی و کوله پل‌ها بخش جدایی ناپذیر پروژه‌های راهسازی به‌شمار می‌آیند. قرارگیری دیوارها در نزدیکی یکدیگر سبب شده است که رفتار این دیوارها از پیچیدگی خاصی برخوردار باشد. با وجود وجود این پیچیدگی، در توصیه‌های ارائه شده برای تحلیل و طراحی این دسته از دیوارها، تنها تأثیر فاصله بین دو دیوار لحاظ شده و تأثیر بسیاری از عوامل موثر دیگرمانند نوع و چیدمان المان‌های تسلیح در نظر گرفته نشده است. پس در این تحقیق تلاش شد تا با بهره‌گیری از مدلسازی فیزیکی و عددی دیوارهای خاک مسلح پشت به پشت، گامی موثر در شناخت تأثیر توأمان نوع و چیدمان المان‌های تسلیح بر عملکرد این سیستم پرکاربرد برداشته شود. نتایج نشان داد اگرچه استفاده از المان‌های تسلیح انعطاف‌پذیر باعث افزایش تغییر شکل‌های جانبی دیوار و کاهش ظرفیت باربری تراورس می‌شود، اما نقش موثری در کاهش نیروی بسیج شده در المان‌های تسلیح و همچنین تبدیل فشار تراورس به فشار افقی ایفا می‌کند. همچنین مشخص شد که اتصال مستقیم دو دیوار مقابل به یکدیگر با استفاده از المان‌های تسلیح پیوسته و جداسازی کامل آنها از یکدیگر به ترتیب بهترین و بدترین چیدمان المان‌های تسلیح برای بهبود ظرفیت باربری و کاهش تغییر شکل دیوار پشت به پشت می‌باشد. این در حالیست که استفاده از این دو چیدمان به ترتیب باعث بسیج بیشترین و کمترین نیرو در المان‌های تسلیح می‌شود.

کلمات کلیدی

دیوار خاک مسلح پشت به پشت
بستر خطوط ریلی
ژئوسنتتیک‌ها
مدلسازی فیزیکی
مدلسازی عددی

۱- مقدمه

پلسازی مطرح می‌باشند. این دیوارها متشکل از دو دیوار خاک مسلح بوده که به صورت متقارن و با فاصله محدود از یکدیگر مطابق با شکل (۱) ساخته می‌شوند. عرض محدود خاکریز از یک سو و فاصله اندک بین دو دیوار که سبب تأثیر متقابل آنها روی یکدیگر می‌شود از سوی دیگر سبب بروز اختلافات فاحش بین رفتار دیوارهای پشت به پشت و دیوارهای خاک مسلح متداول شده است [1]. این امر سبب شده که در آیین‌نامه‌های طراحی، فاصله میانی دیوارها (فاصله پشت تا

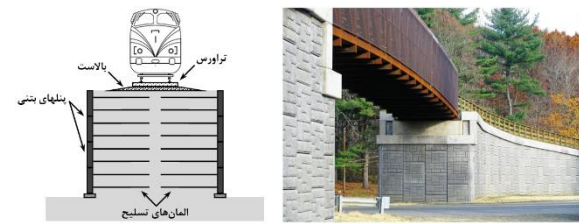
عملکرد مناسب سیستم‌های خاک مسلح و همچنین سهولت و سرعت مناسب اجرای آن در مقایسه با سایر سیستم‌های نگهدارنده سبب شده است که حوزه استفاده از آن در پروژه‌های راهسازی طی دهه‌های اخیر گسترش قابل ملاحظه‌ای یابد. در این میان، پروژه‌های پل‌سازی نیز از این قاعده جدا نبوده است به طوری‌که امروزه دیوارهای خاک مسلح پشت به پشت برای ساخت راه دسترسی و کوله پل‌ها به عنوان یک بخش اصلی از یک پروژه

* رایانامه نویسنده مسئول: M.yazdandoust@qom.ac.ir - ORCID: 0000-0003-4355-118X

کپی‌رایت © ۲۰۲۶، انتشارات دانشگاه تربیت مدرس (TMU Press). این مقاله به‌صورت دسترسی آزاد منتشر شده و تحت مجوز بین‌المللی Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 قرار دارد (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>). بر اساس این مجوز، شما می‌توانید این مطلب را در هر قالب و رسانه‌ای کپی، بازنشر و بازآفرینی کنید و یا آن را ویرایش و بازسازی نمایید، به شرط آنکه نام نویسنده را ذکر کرده و از آن برای مقاصد غیرتجاری استفاده کنید.



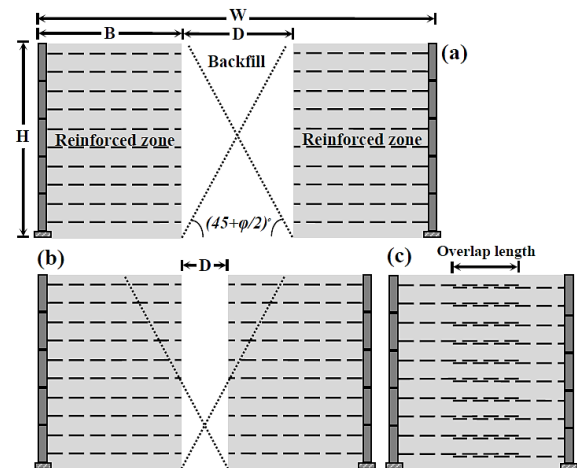
بر اساس این طبقه بندی، بیشترین پیچیدگی رفتار مربوط به گروه های ۲ و ۳ می باشد که این دو گروه بیشترین کاربرد را در صنعت راه سازی به خود اختصاص می دهند. تأثیر پذیری عملکرد دیوارهای خاک مسلح پشت به پشتاز طیف وسیعی از عوامل (از جمله جنس و آرایش المان های تسلیح، هندسه سیستم، شرایط بارگذاری و ...) از یک سو و پیچیده بودن عملکرد این سیستم به دلیل هندسه خاص آن از سوی دیگر منجر به عدم دستیابی به شناختی جامع از عملکرد این سیستم کارآمد برای ارائه دستورالعمل های طراحی شده است [1]. این امر سبب شده است که امروزه تحلیل و طراحی دیوارهای خاک مسلح پشت به پشت بر اساس آیین نامه های سیستم های متداول خاک مسلح صورت گیرد. از سوی دیگر، عدم تطابق میان عملکرد دیوارهای خاک مسلح پشت به پشت و سیستم های متداول، درستی استفاده از توصیه های مربوط به سیستم های متداول را برای بکارگیری دیوارهای خاک مسلح پشت به پشت در هاله ای از ابهام قرار می دهد. این امر سبب شده که مطالعاتی در این حوزه با رویکردهای مختلف به انجام برسد. چائوهان^۱ و همکاران با انجام یک سری مطالعات عددی روی دیوارهای پشت به پشت تحت بار ثقلی، طول $0.3H$ را به عنوان طول بهینه همپوشانی المان های تسلیح برای به حداقل رساندن فاصله دو دیوار متقابل توصیه نمودند [2]. بررسی رفتار یک دیوار پشت به پشت در معرض بارگذاری ناشی از ریل راه آهن توسط لو^۲ و همکاران نشان داد که اتصال دو دیوار به یکدیگر با استفاده از المان های تسلیح یکپارچه، منجر به افزایش قابل توجه نیروی المان های تسلیح می شود [3]. در تحقیقی مشابه توسط آتارا و بالونائینی^۳، مشخص شد که سرعت قطار و سختی المان تسلیح دو پارامتر تأثیرگذار بر فشار جانبی و جابه جایی دیوار پشت به پشت می باشد [4]. وون و کیم^۴ با استفاده از آزمایشات مدل فیزیکی بزرگ مقیاس رفتار بلند مدت دیوارهای پشت به پشت مسلح شده با ژئوتکستایل را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند در دیوارهایی که فاصله میانی بیشتر از 0.88 ارتفاع باشد، هیچ برهمکنشی بین دو دیوار شکل نمی گیرد و دیوارها به طور مستقل عمل می کنند. در این شرایط بیشترین



شکل ۱. تصویر واقعی و نمایی شماتیک از یک دیوار خاک مسلح پشت به پشت

پشت به عنوان بستر خطوط ریلی

Fig. 1. Actual image and schematic view of a back-to-back reinforced MSE wall as railway embankments



شکل ۲. تقسیم بندی دیوارهای پشت به پشت (الف: دیوارهای مستقل؛ ب)

دیوارهای وابسته بدون طول همپوشانی؛ ج) دیوارهای وابسته با طول همپوشانی

Fig. 2. The division of back-to-back MSE walls: (a) independent walls; (b) dependent walls without the overlap length of reinforcements (L_0); (c) dependent walls with L_0

پشت المان های تسلیح، D به عنوان یک پارامتر کلیدی در نظر گرفته شود و دیوارهای خاک مسلح پشت به پشت بر اساس این فاصله در سه گروه به شرح ذیل طبقه بندی شوند [1]:

گروه ۱) دیوارهایی با فاصله میانی بیشتر از $H \times \tan(45^\circ - \Phi/2)$: در این حالت دیوارها به طور مستقل رفتار نموده و به صورت مجزا طراحی می شوند که در آن ارتفاع دیوار و Φ زاویه اصطکاک خاک می باشد (شکل ۲-الف).

گروه ۲) دیوارهایی با فاصله میانی بین 0 تا $H \times \tan(45^\circ - \Phi/2)$: در این حالت فشار محرک پشت دیوارها بطور کامل بسیج نخواهد شد و اثر متقابل دیوارها روی یکدیگر باید در نظر گرفته شود (شکل ۲-ب).

گروه ۳) دیوارهایی بدون فاصله میانی و متشکل از طول همپوشانی المان های تسلیح (L_0): در این حالت دیوارها بطور یکپارچه رفتار نموده و تنها گسیختگی داخلی کنترل خواهد شد

(شکل ۲-ج).

¹ Chauhan

² Lo

³ Attara and Balunaini

⁴ Won and Kim

موضوع مهم دیگری بود که توسط راجاگوپال^۸ و همکاران مورد بررسی قرار گرفت. آنها نشان دادند که سختی المان تسلیح نقش چشمگیری در کاهش جابه جایی های جانبی ناشی از برقراری جریان در بدنه این دیوارها دارد [14].

بررسی تحقیقات فوق نشان می دهد که بیشتر مطالعات انجام شده روی دیوارهای خاک مسلح پشت به پشت بر فاصله بین دو دیوار تمرکز دارد و تأثیر سایر پارامترها مانند نوع و چیدمان المان های تسلیح هنوز ناشناخته باقی مانده است. از این رو در این مطالعه کوشش شد تا با بهره گیری از مدلسازی فیزیکی و عددی دیوارهای خاک مسلح پشت به پشت گامی موثر در شناخت تأثیر توأمان نوع و چیدمان المانهای تسلیح بر عملکرد این سیستم در قالب تغییر شکل های جانبی و قائم خاکنیز و همچنین نیروهای بسیج شده در المان های تسلیح برداشته شود. برای این منظور، با انتخاب ژئوتکستایل و تسمه پلیمری در مدل های عددی و ژئوگرید و تسمه فلزی در مدل های فیزیکی و همچنین ۶ چیدمان مختلف از المان های تسلیح متشکل از طول همپوشانی متفاوت و موقعیت مختلف اتصال دو دیوار روبرو به هم، اقدام به ساخت ۱۲ مدل عددی و ۱۲ مدل فیزیکی دیوار پشت به پشت با مقیاس ۱:۱۰ و شبیه سازی بار استاتیکی ناشی از ریل راه آهن روی آنها شد.

۲- مدلسازی فیزیکی

برای ساخت مدل های فیزیکی و انجام آزمایشات، از یک دستگاه بارگذاری سطحی با ظرفیت ۴۰ کیلونیوتن استفاده شد. این دستگاه شامل یک جعبه آزمایش به ابعاد ۱/۲ متر (طول) × ۰/۹ متر (ارتفاع) × ۰/۶ متر (عرض) برای ساخت مدل، یک جک الکترومکانیک برای اعمال بار قائم و یک قاب صلب برای بارگذاری در نقاط مختلف جعبه بود. برای دستیابی به شرایط کرنش صفحه ای در مدل ها، اصطکاک بین دیواره های جانبی جعبه و بدنه مدل با قرار دادن ورقه های نازک پوشیده شده با گریس به حداقل رسانده شد. علاوه بر این، برای کاهش تغییر شکل جانبی جعبه آزمایش از دو مهار جانبی متحرک استفاده شد که در طول ساخت مدل و بارگذاری روی جعبه نصب و پس از آن برداشته شد. تصویری از دستگاه بارگذاری سطحی در شکل (۳) ارائه شده است.

تغییر شکل جانبی در ارتفاع یک سوم میانی دیوار رخ می دهد [5]. این نتایج در مطالعه ای دیگر نیز توسط فرانچسکا^۱ حاصل شد [6]. آنوها و باسودهار^۲ با بررسی رفتار دیوارهای پشت به پشت تحت بار ناشی از یک فونداسیون نواری نشان دادند که افزایش تعداد ردیف های المان های تسلیح منجر به کاهش تغییر شکل های جانبی و همچنین ممانعت از توسعه صفحه گسیختگی به لایه های زیرین می شود [7]. واداداگی و چاولا^۳ با بررسی دیوارهای پشت به پشت مسلح شده با ژئوگرید نشان دادند که اثر همپوشانی ژئوگریدها در کاهش جابه جایی جانبی دیوارهای پشت به پشت بیشتر از اتصال مستقیم دو دیوار به یکدیگر است [8]. هان و لشنسکی^۴ با استفاده از آنالیز تعادل حدی نشان دادند که در دیوارهایی بدون فاصله میانی، نادیده گرفتن فشار جانبی خاک در ناحیه مسلح شده منجر به طراحی نایمن می شود. آنها همچنین ادعا کردند که استفاده از المان های تسلیح پیوسته برای اتصال دو دیوار مقابل به یکدیگر می تواند راه حل مناسبی برای دستیابی به یک طراحی اقتصادی باشد [9]. در مطالعه ای مشابه، ژنگ^۵ و همکاران نشان دادند که دستورالعمل های FHWA فشار جانبی خاک در پشت ناحیه مسلح شده و حداکثر نیروی کششی المان های تسلیح را به ترتیب کمتر و بیشتر از واقعیت برآورد می کند [10]. سروانام^۶ و همکاران ضمن تأیید این یافته نشان دادند که فشار فعال پشت ناحیه مسلح شده با کاهش فاصله بین دو دیوار به طور قابل توجهی کاهش می یابد [11]. در مطالعه ای دیگری توسط سروانام و همکاران مشخص شد که فرض شرایط سکون برای تحلیل دیوارهای پشت به پشت با المان های تسلیح پیوسته می تواند منجر به طراحی بسیار محافظه کارانه شود [12]. در مطالعه ای مشابه توسط ژو^۷ و همکاران گزارش شد که استفاده از المان های تسلیح پیوسته در دیوارهای پشت به پشت می تواند ظرفیت باربری فونداسیون های نواری واقع بر آنها را بهبود بخشد، به ویژه زمانی که این المان ها در ردیف های بالایی استفاده شوند [13]. عملکرد دیوارهای خاک مسلح پشت به پشت در هنگام بارندگی شدید

¹ Frankowska

² Anubhav and Basudhar

³ Vadavadagi and Chawla

⁴ Han and Leshchinsky

⁵ Benmebarek

⁶ Sravanam

⁷ Xu

⁸ Rajagopal

پروژه کوچک سازی اجزاء مدل اولین و مهمترین گام در یک مدلسازی فیزیکی است. این پروژه که مبتنی بر انتخاب ضریب مقیاس (N) و روابط آنالیز ابعادی می باشد، نقش چشمگیری در کیفیت نتایج ایفا می کند. پس در این تحقیق، از ضریب مقیاس ۱:۱۰ و روابط آنالیز ابعادی توصیه شده توسط وود^۱ که در جدول (۱) ارائه شده است، استفاده شد [15].

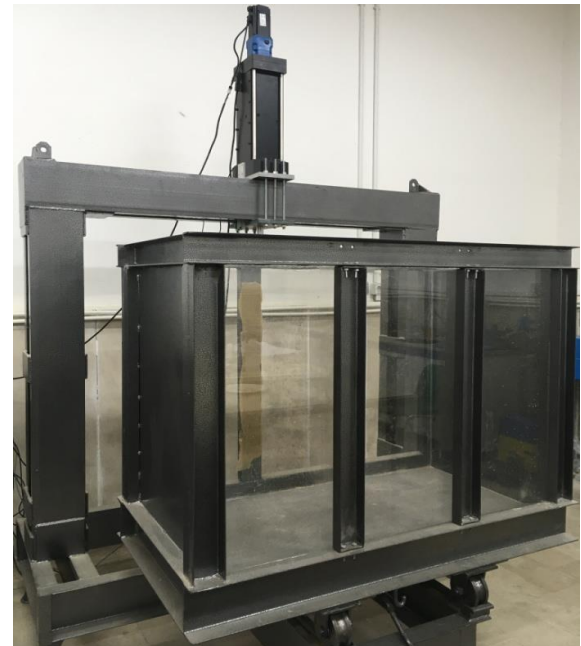
۲-۱- هندسه مدل

هندسه دیوار (ارتفاع و فاصله بین دو دیوار مقابل) یکی از پارامتر تأثیرگذار بر عملکرد دیوارهای پشت به پشت می باشد. بررسی پروژه های راهسازی نشان می دهد که با توجه به کاربرد دیوارهای پشت به پشت (راه دسترسی و کوله پل ها)، ارتفاع آنها بین ۵ تا ۷ متر محدود می شود [10-12]. بنابراین یک دیوار به ارتفاع ۶ متر می تواند نماینده مناسبی برای دیوارهای پشت به پشت باشد. بر اساس این ارتفاع و ضریب مقیاس انتخاب شده، ارتفاع مدل ها برابر با ۰/۶ متر انتخاب شد. از سوی دیگر، از آنجا که رفتار گروه های دوم و سوم دیوارهای پشت به پشت از پیچیدگی خاصی برخوردار است [1] و تحقیقات محدودی نیز روی این گروه از دیوارها انجام شده است، پس با انتخاب فاصله دیوارها از یکدیگر برابر با ۰/۶ متر، تلاش شده تا مدل ها در دسته این گروه از دیوارهای پشت به پشت قرار گیرند.

۲-۲- اجزاء مدل

از آنجا که نوع خاک مورد استفاده در دیوارهای خاک مسلح باید در چارچوب توصیه های دستورالعمل های طراحی انتخاب شود [1]، از ماسه ۱۶۱ فیروزکوه با دانسیته نسبی ۸۵ درصد ($Dr > 85\%$) به عنوان یک خاک دانه ای بر اساس توصیه FHWA استفاده شد. آزمایشات انجام شده روی این خاک نشان داد که در این دانسیته نسبی، این خاک زاویه اصطکاک در محدود زاویه اصطکاک خاک های توصیه شده در FHWA تولید می کند. پارامترهای فیزیکی و مکانیکی این خاک که توسط آزمایشات سه محوری تعیین شده است در جدول (۲) ارائه شده است.

المان رویه، پارامتر تأثیرگذار دیگری بر عملکرد دیوارهای خاک مسلح می باشد. اما از آنجا که انتخاب آن بر اساس نوع المان تسلیح صورت می گیرد، باید المانی برای رویه دیوارها انتخاب شود که برای تمامی المان های تسلیح انتخاب شده در این تحقیق قابل



شکل ۳. نمای از دستگاه بارگذاری سطحی

Fig. 3. View of the surface loading device

جدول ۱. روابط آنالیز ابعادی

Table 1. Similitude rules [15]

Description	Parameter	Scaling factor (Prototype/Model)
Length (m)	L	N
Unit weight (kN/m^3)	ρ	1
Stress (kN/m^2)	σ	N
Soil strain (-)	ε_s	$N^{1-\alpha}$
Soil stiffness (kN/m^2)	E_s	N^α
Reinforcement strain (-)	ε_r	1
Reinforcement tensile stiffness per unit wall width (kN/m)	J	N^2
Pullout resistance per unit wall width (kN/m/m)	P_R	N
Flaxtural resistance per unit width (kN.m/m)		N^3

جدول ۲. مشخصات خاک مورد استفاده در مدل های فیزیکی

Table 2. Properties of soil used in physical models

Physical parameters	Value	Shear strength parameters	Value
Max. void ratio, [-]	0.786	Cohesion, [kPa]	4
Min. void ratio, [-]	0.571	Peak friction angle, [°]	44-47
Specific gravity [-]	2.66	Ulti. friction angle, [°]	38-41
Cu, [-]	2.655	Dilation angle, [°]	8-9
Cc, [-]	1.147	Secant modulus [MPa]	2.1-5.5

¹ Wood

جدول ۳. پارامترهای المان‌های تسلیح در مقیاس مدل

Table 3. Properties of reinforcement element at model Scale

Index properties	Metal strip	Geogrid
Material	Phosphor Bronze	Polypropylene
Thickness [mm]	0.4	0.90
Longitudinal and transverse rib width, b_l, b_t [mm]	5.0, ---	0.90, 0.6
Longitudinal and transverse opening size, $s_l \times s_t$ [mm]	---	7.5×7.5
Elongation at ultimate tensile load, ϵ_u [%]	0.46	6.28
Secant tensile stiffness per unit wall width at ϵ_u , J [kN/m]	356.8	19.56
Pullout resistance under, P_R [kN/m/m]	0.93	14.75



شکل ۴. تصاویری از رویه بتنی صلیبی به همراه المان‌های تسلیح

Fig. 4. Reduced scale cruciform concrete panels with reinforcement elements

۲-۳- چیدمان المان‌های تسلیح

از آنجا که طول همپوشانی و موقعیت المانهای تسلیح پیوسته در دیوار دو پارامتر تأثیر گذار بر عملکرد دیوارهای خاک مسلح پشت به پشت می‌باشند [8, 13]، شش چیدمان مختلف از المان تسلیح برای بررسی این دو پارامتر انتخاب شد.

همان‌طور که در شکل (۵) ارائه شده است، در ۳ چیدمان اول (مدل‌های ۱، ۲ و ۳ مسلح شده با تسمه فلزی و مدل‌های ۷، ۸ و ۹ مسلح شده با ژئوگرید)، با تغییر موقعیت المان‌های تسلیح پیوسته امکان بررسی تأثیر محل استفاده از المان‌های پیوسته (اتصال مستقیم دو دیوار به هم با المان‌های تسلیح پیوسته) فراهم می‌شود و در ۳ چیدمان دوم (مدل‌های ۴، ۵ و ۶ مسلح شده با تسمه فلزی و مدل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ مسلح شده با ژئوگرید)، با تغییر طول همپوشانی، امکان بررسی تأثیر این پارامتر مهیا خواهد شد. لازم به ذکر است که بر اساس توصیه FHWA، فاصله قائم بین لایه المان‌های تسلیح و فاصله افقی بین تسمه‌ها برابر با ۰/۰۷۵ متر انتخاب شدند [1].

کاربرد باشد. پانل‌های بتنی پیش‌ساخته یکی از محدود المان‌هاست که بر اساس تحقیق صورت گرفته توسط باترست^۱، هم برای المانی‌های تسلیح منفرد (تسمه‌ها) و هم برای المان‌های تسلیح صفحه‌ای (ژئوگریدها، ژئوتکستایل‌ها، شبکه‌های فلزی) قابل استفاده است. از اینرو، پانل بتنی پیش‌ساخته صلیبی به ابعاد ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر به عنوان المان رویه مدل‌ها انتخاب شد. برای انتخاب جایگزین پانل‌های بتنی در مدل‌های کوچک مقیاس، از معیار سختی خمش و قانون تشابه حاکم بر آن استفاده شد. برای این منظور، با انجام یک سری آزمایش تعیین ظرفیت خمشی سه نقطه‌ای روی یک پنل بتنی واقعی و تکرار این آزمایش روی صفحات ساخته شده از ملات‌هایی با طرح اختلاط‌های مختلف در سن ۲۸ روزه‌گی، کوشش شده به طرح اختلاطی دست یافته شود که معیار تشابه ظرفیت خمشی را ارضاء نماید. این هدف در پنلی متشکل از یک شبکه فلزی با قطر مفتول ۰/۶ میلیمتر و ابعاد چشمه ۱۰×۱۰ میلی‌متر که توسط ملات سیمان به ضخامت ۱۰ میلی‌متر پوشانده شده بود، تحقق یافت. این ملات با نسبت آب به سیمان ۰/۵، عیار سیمان ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و محتوای ماسه ۱۵۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب ساخته شده بود.

همان‌طور که پیش از این نیز اشاره شد، تسمه فلزی و ژئوگرید به ترتیب به عنوان نماینده المان‌های انعطاف ناپذیر و انعطاف پذیر برای تسلیح مدل‌ها در نظر گرفته شد. به منظور شبیه‌سازی این دو المان تسلیح در مقیاس ۱:۱۰، از دو معیار سختی کششی و ظرفیت بیرون کشیدگی استفاده شد. در این راستا، سختی کششی و ظرفیت بیرون کشیدگی یک تسمه فلزی و یک ژئوگرید واقعی با استفاده از آزمایشات مربوطه تعیین و سپس تلاش شد تا با انجام این آزمایشات روی المانهای کوچک مقیاس با جنس، سطح ظاهری و هندسه مختلف، المانهایی انتخاب شوند که سختی و ظرفیت بیرون کشیدگی‌شان معیارهای تشابه را ارضاء نمایند. در نهایت، یک تسمه صاف از جنس فسفر برنز به عرض ۵ میلیمتر و ضخامت ۰/۴ میلیمتر و یک مش از جنس پلی‌پروپیلن با ابعاد چشمه ۷/۵×۷/۵ میلیمتر توانستند معیار سختی کششی و ظرفیت بیرون کشیدگی معادل تسمه فلزی و ژئوگرید را ارضاء نمایند. پارامترهای فیزیکی و مکانیکی تسمه فلزی و ژئوگرید در مقیاس مدل در جدول (۳) و همچنین، تصویری از پانل صلیبی کوچک مقیاس به همراه المان‌های تسلیح انتخاب شده در شکل (۴) ارائه شده است.

¹ Bathurst



شکل ۷. نمایی از ابزار دقیق‌های نصب شده روی دیوار مدل

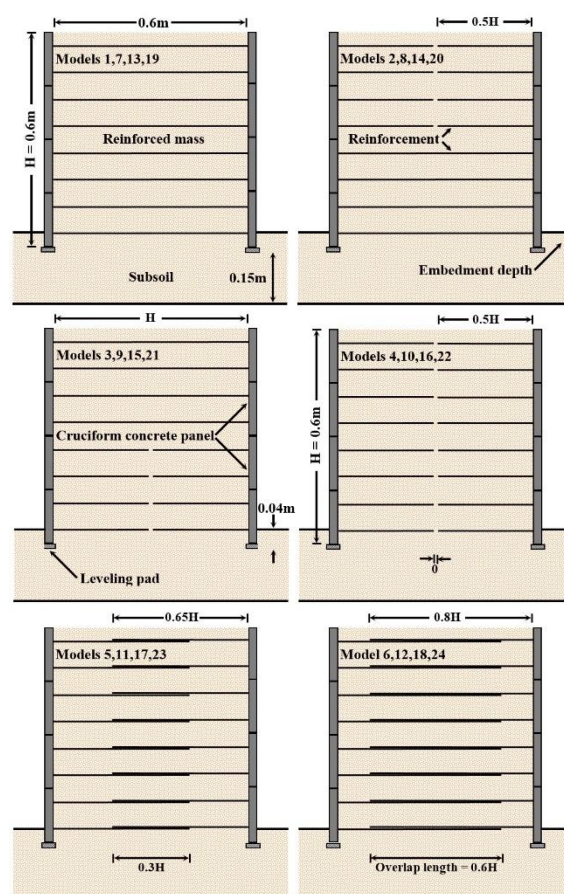
Fig. 7. View of instrumentations mounted on the model

۲-۴- ساخت مدل، ابزارگذاری و بارگذاری

پروژه ساخت هر مدل با ساخت یک پی به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر به روش کوبش مرطوب و کنترل حجم آغاز شد. این ناحیه امکان وقوع نشست‌های احتمالی را برای مدل‌ها فراهم می‌ساخت. پس از اتمام ساخت پی، ۲ عدد نوار پیش‌ساخته بتنی^۱ به ضخامت ۱ سانتی‌متر، عرض ۵ سانتی‌متر و طولی برابر با عرض جعبه آزمایش به عنوان سطوح ترازکننده بلوک‌های رویه به گونه‌ای روی پی و در محل احداث رویه‌ها قرار داده می‌شدند که سطح فوقانی آنها هم‌تراز با سطح تمام‌شده پی واقع شود. پس از نصب نوارهای مذکور، ساخت بدنه مدل‌ها با نصب اولین ردیف بلوک و اجرای اولین لایه خاک به ضخامت ۳/۷۵ سانتی‌متر و نصب اولین ردیف المان‌های تسلیح روی آن آغاز شد. ساخت بدنه مدل با تکرار این روند تا رسیدن با ارتفاع ۶۰ سانتی‌متر ادامه یافت. استقرار المان‌های تسلیح در برخی از مدل‌ها در شکل (۶) نشان داده شده است.

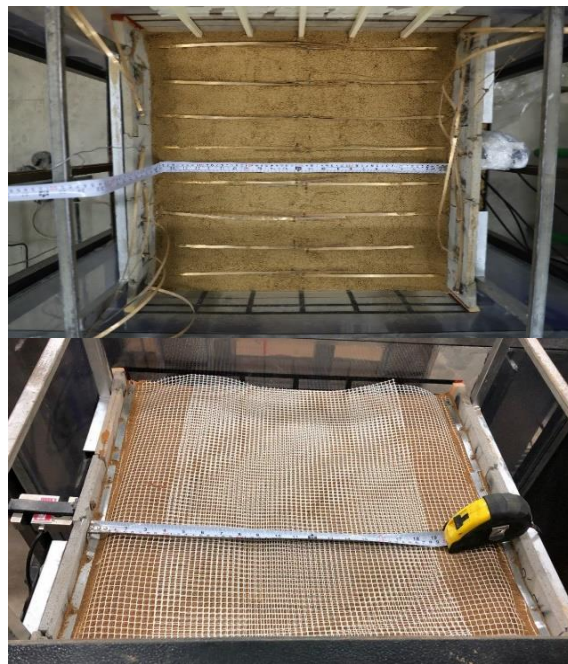
پس از تکمیل پروژه ساخت مدل‌ها، ابزارگذاری مدل‌ها به ترتیب با نصب ۶ و ۴ جابه‌جایی سنج برای اندازه‌گیری تغییر شکل‌های افقی دیوار و قائم سطح خاکریز و همچنین ۴ نیروسنج برای تعیین نیروی بسیج شده در رأس المان‌های تسلیح واقع شده در ردیف‌های ۲، ۴، ۶ و ۸ انجام شد. شکل (۷) موقعیت ابزار دقیق‌های نصب شده روی وجه چپ مدل را نشان می‌دهد.

پس از ابزارگذاری مدل‌ها، بارگذاری آنها با شبیه‌سازی ریل و تراوس بر روی خاکریز مدل‌ها دنبال می‌شد. برای این منظور، مطابق



شکل ۵. چیدمان المان‌های تسلیح در مدل‌های مختلف

Fig. 5. Arrangement of reinforcement elements in different models



شکل ۶. نمایی از استقرار المان‌های تسلیح در مدل‌های دیوار

Fig. 6. Placement of reinforcement in wall models

¹ Leveling pad

با شرایط واقعی و بر اساس قوانین تشابه، ابتدا یک لایه بالاست به ضخامت ۱/۵ سانتیمتر اجرا و سپس نوارهای چوبی به طول، عرض و ضخامت ۲۴، ۲/۵ و ۱/۵ سانتیمتر و به فواصل ۵/۵ سانتیمتر روی لایه بالاست قرار داده می‌شد. این نوارهای چوبی که معادل تراورس‌های چوبی واقعی بودند، به دو پروفیل فلزی موازی با طول معادل عرض باکس و فاصله ۱۵ سانتیمتر از یکدیگر متصل می‌شدند که نمایندگان ریل آهنی بودند. در انتها، بار قائم از طریق این دو ریل به تراورسها و نهایتاً به مدلها اعمال و پاسخ آن در قالب تغییر شکل‌های افقی و قائم و همچنین نیروهای بسیج شده در المان‌های تسلیح ثبت شد.

۳- مدلسازی عددی

به منظور انجام فاز مطالعات عددی، از نسخه ۸/۲ نرم افزار PLAXIS-2D استفاده شد. به دلیل وجود المان مجزای ژئوسنتتیک و همچنین امکان ایجاد آسان لایه‌های خاکی در این نرم افزار، مدلسازی دیوارهای خاک مسلح پشت به پشت با دقت و سرعت بالایی به انجام رسید. در PLAXIS-2D از المان‌های مثلثی که دارای ۱۵ گره و ۱۲ نقطه تنش می‌باشند استفاده می‌شود، چرا که المان ۱۵ گره‌ای، المانی دقیق‌تر برای دستیابی به نتایج بهتر در مسائل پیچیده می‌باشد.

۳-۱- فرایند ساخت مدل‌ها

به منظور انجام تحلیل‌های عددی در شرایطی مشابه با مدل‌های فیزیکی، مدل‌های عددی با هندسه‌ای مشابه با مدل‌های فیزیکی در محیط PLAXIS شبیه‌سازی شدند. برای این منظور، دیوارهای پشت به پشت با عرض و ارتفاع ۰/۶ متر روی یک پی به عرض و ضخامت ۰/۱۵ و ۱/۲۰ متر ساخته شدند. برای شبیه‌سازی شرایط مرزی این ناحیه، از تکیه‌گاه‌های غلتکی در مرزهای جانبی و از تکیه‌گاه مفصلی در مرز تحتانی استفاده شد. این امر امکان نشست‌های احتمالی ناحیه پی را فراهم می‌ساخت. مانند مدل‌های فیزیکی، مدلسازی عددی دیوارها به صورت ساخت مرحله‌ای انجام شد به این شکل که در پایان اجرای هر مرحله، تحلیل برای توزیع واقعی تنش در مدل انجام شد. مدلسازی عددی هر دیوار با ساخت یک پی به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر آغاز می‌شد و پس از اتمام ساخت ناحیه پی، با جایگذاری ۲ المان تیر^۱ در سطح ناحیه پی و در زیر اولین ردیف المان‌های رویه هر

دیوار، تلاش می‌شد تا مانند مدل‌های فیزیکی، فونداسیون‌های تنظیم مدل شود. همان‌طور که در مدل‌های فیزیکی نیز شرح داده شده است، اجرای این فونداسیون‌های تنظیم مانع از تمرکز تنش ناشی از وزن رویه بر روی پی می‌شد. پس از تعریف المان‌های تیر، ساخت بدنه مدل‌ها با نصب اولین ردیف بلوک و اجرای اولین لایه خاک به ضخامت ۳/۷۵ سانتی‌متر و نصب اولین ردیف المان‌های تسلیح روی آن آغاز شد. برای مدلسازی بلوک‌ها از المان تیر با رفتار الاستوپلاستیک و با سختی خمشی ۰/۳۹ کیلونیوتن-متر بر متر استفاده شد. این سختی برابر بود با آنچه برای المان‌های بلوک در مدل‌های فیزیکی اندازه‌گیری شده بود. اتصال بین المان‌های تیر معادل المان‌های رویه به یکدیگر و همچنین اتصال بین المان‌های تیر معادل اولین ردیف رویه با فونداسیون تنظیم به ترتیب به صورت اتصال مفصلی و اتصال غلتکی مدل شد. برای در نظر گرفتن اندرکنش بین خاک و المان‌های تیر، از المان سطح مشترک استفاده شد. این المان که از یک سو به المان تیر و از دیگرسو به شبکه خاک متصل می‌شود، اندرکش را با استفاده از یک ضریب، موسوم به "زاویه اصطکاک المان سطح مشترک"، شبیه‌سازی می‌نماید. این زاویه برابر با دو سوم زاویه اصطکاک خاک در نظر گرفته شد [2, 3, 13]. همچنین، برای مدلسازی المان‌های تسلیح، بطور همزمان از المان ژئوگرید با رفتار الاستوپلاستیک و المان سطح مشترک استفاده شد. به دلیل آنکه مدل‌های فیزیکی مسلح شده با ژئوگرید برای درستی آزمایشی مدل‌های عددی انتخاب شدند، پس در مدل‌های عددی اولیه از ژئوگریدهایی با سختی کششی ۱۹/۵۶ کیلونیوتن بر متر و مقاومت کششی ۱/۲۵ کیلونیوتن بر متر استفاده شد (مشابه آنچه در مدل‌های فیزیکی برای ژئوگرید مورد استفاده بدست آمد). زاویه اصطکاک المان سطح مشترک به گونه‌ای با سعی و خطا انتخاب شد که رفتار مدل‌های عددی به مدل‌های آزمایشگاهی انتخاب شده تا حد ممکن نزدیک شود. این زاویه حدود سه پنجم زاویه اصطکاک بیشینه خاک تعیین شد. از مدل الاستوپلاستیک موهر-کلمب نیز برای تعریف مصالح خاکی استفاده شد. بر اساس نتایج بدست آمده از آزمایشات سه محوری روی خاک مورد استفاده در مدل‌های فیزیکی، پارامترهای مورد نیاز برای تعریف توده خاک در مدل‌های عددی مطابق جدول (۱) تعریف شد. ساخت بدنه مدل عددی با تکرار این روند تا رسیدن با ارتفاع ۰/۶ متر و تکمیل مدل ادامه یافت.

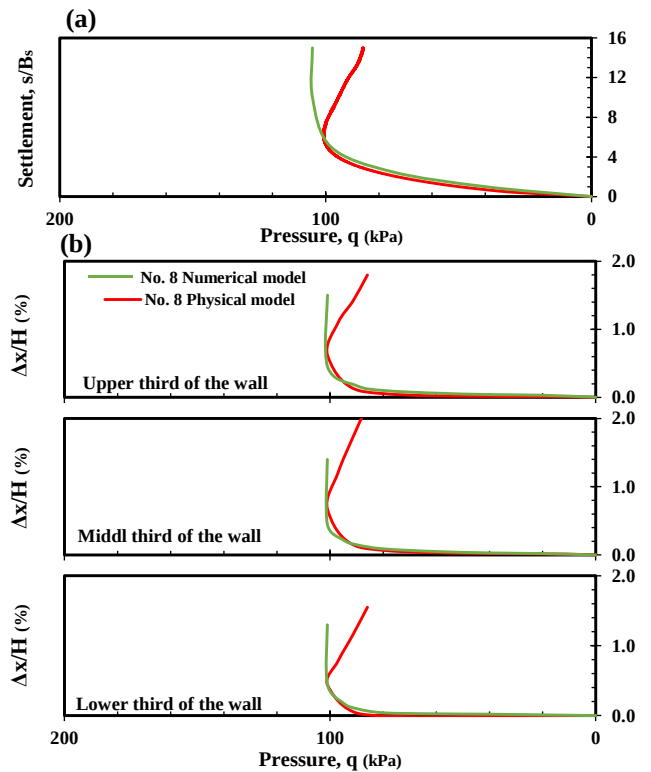
¹ Beam

۳-۲- صحت سنجی

از مدل‌های فیزیکی مسلح شده با ژئوگرید برای درستی‌آزمایی مدل‌های عددی استفاده شد. به منظور آنکه هم سازوکار سختی المان تسلیح و هم اندرکنش آن با خاک در پروسه صحت سنجی لحاظ شود، درستی‌آزمایی از مدل ۸ (مدل با ژئوگریدهای ناپیوسته در بخش فوقانی و پیوسته در بخش تحتانی) آغاز و پس از دستیابی به آن برای سایر مدل‌ها (مدل‌های ۷، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲) کنترل شد. برای این منظور، مدل عددی متناظر با مدل فیزیکی شماره ۸ آماده و سپس تحت یک بار خطی مونوتونیک به عرض ۰/۲۴ متر تا لحظه گسیختگی قرار گرفت و جابه‌جایی جانبی آن در نشست‌های قائم مختلف ثبت شد. در شکل (۸)، نمودارهای بار-نشست و بار-جابه‌جایی افقی مدل شماره ۸ عددی و فیزیکی ارائه شده‌اند.

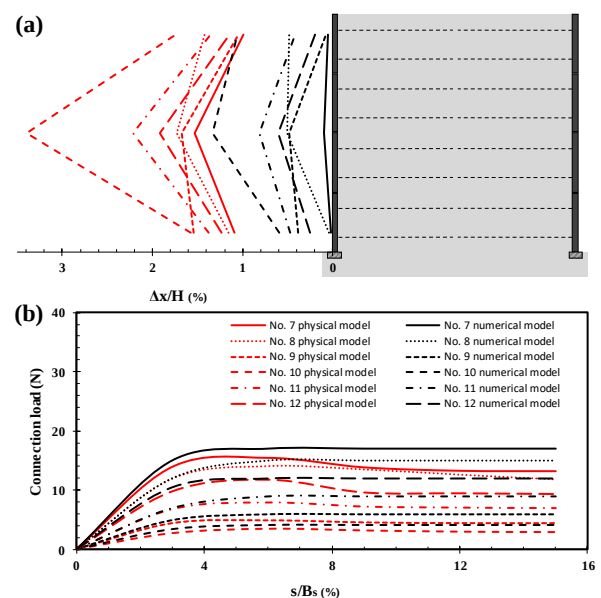
مقایسه بین نمودارهای ارائه شده در شکل (۸) حاکی از تطابق مناسب پاسخ مدل‌های فیزیکی با مدل‌های عددی قبل از تجربه فشار قائم بیشینه و در نتیجه درستی مدل عددی می‌باشد. علت تفاوت بین رفتار بار-نشست و بار-جابه‌جایی افقی در مدل‌های عددی با مدل‌های فیزیکی بعد از رسیدن به فشار قائم بیشینه، استفاده از مدل رفتاری پلاستیک کامل برای خاک و المان‌های تسلیح در مدل‌های عددی است. این امر سبب شده است که پدیده نرم شوندگی بعد از رسیدن به این فشار در مدل‌های عددی قابل مشاهده نباشد. از آنجا که فشار قائم بیشینه در نشستهای بزرگتر از نشست مجاز رخ می‌دهد و بررسی رفتار مدل‌ها بعد از تجربه این نشست مدنظر قرار نمی‌گیرد، از اینرو عدم تطابق رفتار مدل عددی با مدل آزمایشگاهی بعد از تجربه نشست بیشینه قابل چشم‌پوشی است.

پس از کسب این درستی‌آزمایی، مقایسه جابه‌جایی‌های جانبی و نیروی بسیج شده در رأس المان‌های تسلیح سایر مدل‌های عددی (مدل‌های ۷، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲) نیز با مدل‌های فیزیکی متناظر انجام شد که نشان دهنده درستی عملکرد مدل‌های عددی می‌باشد. این مقایسه در شکل (۹) ارائه شده است. در شکل (۱۰) نیز توزیع تنش قائم در مدل‌های عددی ارائه شده است.



شکل ۸. نمودارهای: (الف) بار-نشست و (ب) بار-جابه‌جایی افقی مدل شماره ۸ عددی و فیزیکی

Fig. 8. Relationships of: (a) pressure-settlement; (b) pressure- Δx for No. 8 physical and numerical models



شکل ۹. (الف) پروفیل‌های جابه‌جایی افقی دیوار در نشست ۱۲٪ و (ب) نمودار نیروی المان تسلیح ردیف دوم در مقابل نشست فونداسیون

Fig. 9. (a) Normalized profiles of lateral wall movements at 12% settlement; (b) response of connection load versus footing settlement for 2th reinforcement layer

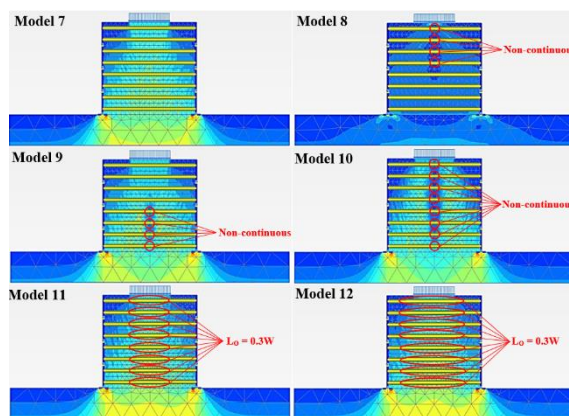
مدلهای عددی جدید با این دو المان تسلیح شد. مدل‌های عددی ساخته شده با تسمه پلیمری (مدل‌های ۱۳ تا ۱۸) و ژئوتکستایل (مدل‌های ۱۹ تا ۲۴) در ۶ آرایش مختلف، مانند مدل‌های فیزیکی، تحت بار خطی مونوتونیک تا لحظه گسیختگی قرار گرفت و پاسخ هر یک در قالب نمودارهای فشار-نشست، تغییر شکل‌های افقی رویه، تغییر شکل‌های قائم خاکریز و نیروی بسیج شده در رأس المان‌های تسلیح ثبت شد. پارامترهای مکانیکی تسمه پلیمری و ژئوتکستایل مورد استفاده که بر اساس مدل واقعی [16, 17] و روابط آنالیز ابعادی بدست آمده است، در جدول (۴) ارائه شده است.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- رفتار بار-نشست

به منظور بررسی تأثیر نوع و چیدمان المان‌های تسلیح بر رفتار بار-نشست تراورس‌های چوبی واقع بر دیوارهای خاک مسلح پشت به پشت، نمودارهای بار-نشست ($q-s/B_s$) حاصل از مطالعات آزمایشگاهی و عددی در شکل (۱۱) ارائه شده‌اند، که در آن q ، s و B_s به ترتیب فشار قائم، نشست و عرض تراورس است. همان‌طور که در منحنی‌های $q-s/B_s$ مدل‌های مسلح شده با ژئوگرید دیده می‌شود، ظرفیت باربری به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد تا زمانی که به ظرفیت باربری نهایی (q_u) برسد و سپس تا رسیدن به حالت پایدار کاهش می‌یابد. این روند، که توسط آنوباو و باسودار^۱ برای دیوارهای مسلح شده پشت به پشت گزارش شده است، نشان دهنده رفتار شکننده دیوارهای مسلح شده با ژئوستتیک‌ها تحت بارگذاری قائم می‌باشد [7]. این رفتار می‌تواند به دلیل بیرون کشیده شدن المان‌های ناپيوسته با طول همپوشانی کوتاه باشد و یا به دلیل پارگی المان‌های پیوسته یا المان‌هایی با طول همپوشانی بلند. این رفتار در مدل‌های عددی مسلح شده با ژئوتکستایل و تسمه پلیمری به آن دلیل دیده نشد که رفتار الاستو-پلاستیک کامل برای المان‌های تسلیح در نظر گرفته شده بود.

کاهش ظرفیت باربری پس از تجربه q_u ضمن استفاده از طول همپوشانی در دیوار برجسته‌تر شد و زمانی که دیوارهای مقابل با استفاده از تقویت‌کننده‌های پیوسته به طور کامل به هم متصل شدند به حداکثر رسید. از این رو، انتظار می‌رود که در دیوارهای مسلح



شکل ۱۰. توزیع تنش قائم در مدل‌های عددی ۷ تا ۱۲

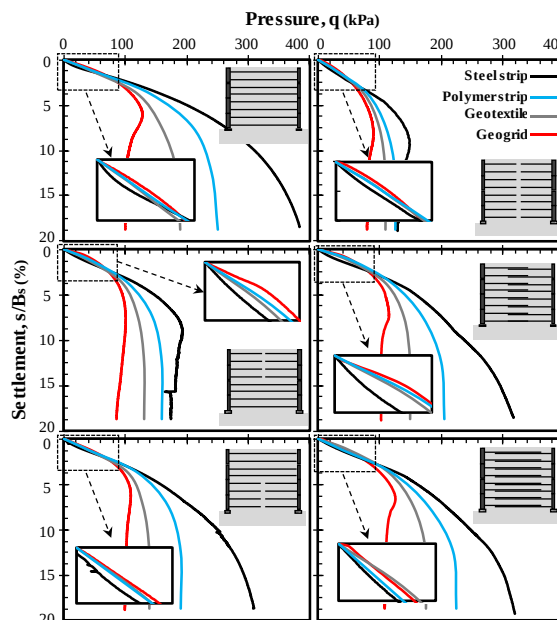
Fig. 10. Vertical stress distribution in No. 7 to 12 numerical models

جدول ۴. پارامترهای فیزیکی و مکانیکی المان‌های تسلیح مورد استفاده در

مدل‌های عددی [16, 17]

Table 4. Properties of reinforcements in numerical models [16, 17]

Index properties	Polymer strip	Geotextile
Ultimate tensile strength, T_u [%]	3.00	1.23
Secant tensile stiffness per unit wall width at ϵ_u , J [kN/m]	40.0	19.56
Pullout resistance under, P_R [kN/m/m]	15.0	14.75



شکل ۱۱. منحنی‌های بار-نشست برای مدل‌های مختلف

Fig. 11. Pressure-settlement relationships for different models

۳-۳- ساخت مدل‌های عددی با تسمه پلیمری و ژئوتکستایل

پس از درستی آزمایشی مدل‌های عددی، اقدام به تغییر المان‌های تسلیح از ژئوگرید به تسمه پلیمری و ژئوتکستایل و ساخت

¹ Anubhav and Basudhar

و خاک سبب می شود که در مقادیر نشست کمتر، ژئوگریدها وارد سازوکار ظرفیت باربری شوند و نقششان مشخص شود. این موضوع می تواند به عنوان یک مزیت برای ژئوگریدها در نظر گرفته شود.

نکته دیگری که در شکل (۱۱) برای تمامی انواع المان تسلیح مشاهده می شود، تأثیر آرایش المان های تسلیح بر ظرفیت باربری است که این تأثیر در مدل های تقویت شده با نوار فلزی پر رنگتر است. همان طور که در شکل (۱۱) و جدول (۵) مشاهده می شود، بیشترین و کمترین مقدار q_u به ترتیب مربوط به مدل هایی است که در آنها دیوارهای مقابل به طور کامل متصل و جدا شده اند. این امر که برای هر چهار المان تسلیح مشاهده شد، نشان می دهد که اتصال دیوارهای مقابل با المان های پیوسته و جداسازی کامل آنها از یکدیگر به ترتیب بهترین و بدترین آرایش المان های تسلیح برای بهبود ظرفیت باربری دیوارهای پشت به پشت است. همانطور که دیده می شود، مقدار q_u در مدل هایی که در آنها از المان های تسلیح غیرپیوسته با طول همپوشانی صفر در نیمه فوقانی دیوار استفاده شده بود، به شدت کاهش یافت. کاهش q_u در چیدمان دوم مدل های مسلح شده با تسمه فلزی و ژئوگرید به ترتیب ۴۰ و ۲۰ درصد بود. این کاهش به قدری زیاد بود که می توان آن را دومین چیدمان نامناسب برای بهبود ظرفیت باربری دیوارهای پشت به پشت معرفی نمود. کاهش ظرفیت باربری هنگام استفاده از المانهای ناپیوسته در نیمه تحتانی دیوار نیز مشاهده شد. این کاهش در چیدمان سوم مدل های مسلح شده با تسمه فلزی و ژئوگرید به ترتیب ۱۸ و ۱۲ درصد بود که تقریباً نصف میزان مشاهده شده در مدل های دارای المان ناپیوسته فوقانی می باشد. این بدان معناست که تأثیر المان های تسلیح فوقانی در دیوارهای پشت به پشت برای بهبود ظرفیت باربری بیشتر از المان های تسلیح تحتانی است. این را می توان به افزایش سهم المانهای تسلیح نزدیک به تراورس ها در تامین فشار جانبی مورد نیاز برای تولید ظرفیت باربری در خاک زیر آنها نسبت داد. وابستگی ظرفیت باربری نهایی و نشست مورد نیاز برای رسیدن به آن به طول همپوشانی نکته دیگری بود که در تمامی مدل ها مشاهده شد. برای درک بهتر این وابستگی، روند تغییرات q_u در مقابل طول همپوشانی (L_0) در شکل (۱۲) ارائه شده است.

شده با ژئوگرید، هنگامی که از المان های تسلیح پیوسته و طول همپوشانی بیشتر استفاده شود، دیوارها در مقابل فشار قائم به شیوه ای شکننده تر رفتار کنند. چنین روندی تنها در چیدمان دوم و چهارم مدل های مسلح شده با تسمه فلزی مشاهده شد و هیچ فشار بیشینه مشخصی در سایر چیدمان های مدل های مسلح شده با تسمه فلزی شکل نگرفت. این را می توان به کم بودن احتمال پارگی نوارهای فلزی پیوسته و نوارهایی که طول همپوشانی قابل توجه دارند نسبت داد. همانطور که برای چیدمان های اول، سوم، پنجم و ششم در مدل های مسلح شده با تسمه فلزی مشاهده می شود، یک تغییر شیب در منحنی های $q-s/B_s$ در محدوده نشستهای بین ۴٪ تا ۱۲٪ ظاهر شد. در این نوع منحنی ها که معمولاً هنگام استفاده از المان های تسلیح با سختی و طول قابل توجه حاصل می شود، مقدار ظرفیت باربری نهایی (q_u) را می توان از تقاطع دو خط مماس ترسیم شده در امتداد قسمت اولیه و آخر منحنی تعیین نمود [18-20].

مقایسه منحنی های $q-s/B_s$ دیوارهای مسلح شده با تسمه فلزی و ژئوگرید نشان می دهد که استفاده از تسمه فلزی به جای ژئوگرید، علاوه بر افزایش q_u نشست مورد نیاز برای رسیدن به ظرفیت باربری نهایی ($(s/B_s)_u$) را نیز افزایش می دهد. اگرچه افزایش ظرفیت باربری نهایی یک مزیت بشمار می رود، اما افزایش $(s/B_s)_u$ می تواند یک نقطه ضعف باشد زیرا اگر $(s/B_s)_u$ خارج از محدوده نشست مجاز باشد، q_u نمی تواند برای طراحی مورد استفاده قرار گیرد. این نکته مهمی است که هنگام انتخاب نوع المان تسلیح برای دیوارهای پشت به پشت باید در نظر گرفته شود. با این حال، مقدار بیشتر q_u در دیوارهای تقویت شده با نوار فلزی نسبت به دیوارهای تقویت شده با ژئوگرید به این معنی است که نقش سختی المان تسلیح در افزایش ظرفیت باربری برجسته تر از اندرکنش خاک-المان تسلیح بوده است زیرا سختی تسمه فلزی ۱۸ برابر ژئوگرید و اندرکنش آن با خاک ۱/۱۸ برابر اندرکنش ژئوگرید با خاک بود. همانطور که در شکل (۱۱) دیده می شود، در مقادیر نشست های کوچک، نقش ژئوگرید در بهبود ظرفیت باربری به مراتب پررنگتر از تسمه های فلزی است. این به دلیل سریع تر فعال شدن اندرکنش خاک با المان تسلیح در مدل های مسلح شده با ژئوگرید در حین بارگذاری است. به عبارت دیگر، جابه جایی مورد نیاز کمتر ژئوگرید در خاک برای فعال شدن اندرکنش بین آن

جدول ۵. ظرفیت باربری مدل‌ها

Table 5. Bearing capacity of models

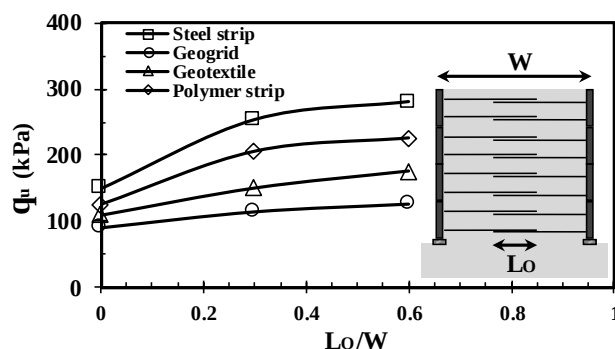
Model	q_u (kPa)	Model	q_u (kPa)
Steel strip	1 325	Geogrid	7 127
	2 193		8 100
	3 268		9 108
	4 149		10 90
	5 254		11 114
	6 281		12 126
Polymer strip	13 250	Geotextile	19 190
	14 160		20 130
	15 190		21 140
	16 125		22 110
	17 205		23 150
	18 225		24 175

همانطور که در شکل (۱۲) مشاهده می‌شود، یک روند صعودی برای q_u را در مقابل طول همپوشانی برای هر چهار نوع المان تسلیح دیده می‌شود با این تفاوت که نرخ رشد در q_u در مدل‌های مسلح شده با تسمه فلزی بسیار بیشتر است. این نرخ بیشتر را می‌توان به پایین بودن ظرفیت بیرون کشیدگی تسمه‌های فلزی نسبت داد که با افزایش طول همپوشانی جبران می‌شود. به عبارت دیگر، در المان‌هایی که اندرکنش ضعیف‌تری با خاک دارند، افزایش طول (طول همپوشانی) می‌تواند یک راهکار برای جبران ظرفیت بیرون کشیدگی آنها باشد، زیرا ظرفیت بیرون کشیدگی در یک المان تسلیح تابعی از طول المان و اندرکنش آن با خاک است [18-20]. روند صعودی q_u در مقابل L_o به تدریج با افزایش طول همپوشانی در هر چهار نوع المان تسلیح کاهش یافت. این نشان می‌دهد که افزایش طول همپوشانی تا یک مقدار معین در بهبود ظرفیت باربری دیوارهای پشت به پشت موثر خواهد بود و این مقدار تابعی از ویژگی‌های دیوار است.

۴-۲- جابجایی جانبی دیوار

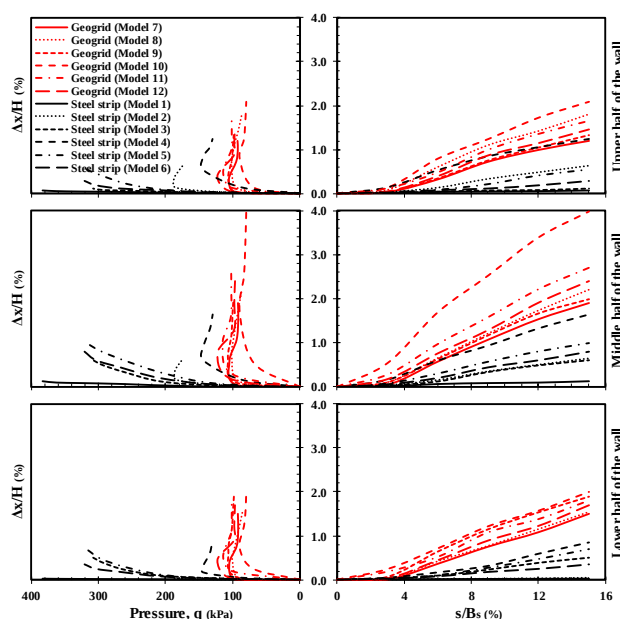
به منظور بررسی پاسخ جابه‌جایی افقی دیوار، از جابه‌جایی‌های جانبی همسنگ شده ($\Delta x/H$) استفاده شد. همسنگ نمودن جابه‌جایی‌های جانبی که با استفاده از سه LVDT نصب شده روی هر دیوار در طول بارگذاری اندازه‌گیری شده بود و بی‌بعد نمودن آنها این امکان را فراهم می‌نمود که اثر مقیاس کم‌رنگ‌تر شده و مقادیر بدست آمده بتواند به دیوارهایی با سایر ارتفاع‌ها تعمیم داده شود. به منظور ارزیابی پاسخ جابه‌جایی جانبی دیوار به بارگذاری قائم، فشار تراورس و نشست آن به عنوان دو معیار انتخاب و روند تغییرات جابه‌جایی جانبی دیوار در مقابل این دو معیار تعیین شدند که در شکل (۱۳) نشان داده شده است. علاوه بر آن، پروفیل $\Delta x/H$ نیز در چهار مقدار نشست مختلف اندازه‌گیری شد که در شکل (۱۴) ارائه شده‌اند. انتخاب این مقادیر امکان ارزیابی توزیع جابجایی جانبی در دیوارها را قبل و بعد از تجربه q_u فراهم می‌سازد.

همان‌طور که در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود، یک وابستگی بین جابه‌جایی‌های جانبی دیوار و نشست تراورس‌ها وجود دارد. همانطور که آنوایو و باسودار برای دیوارهای پشت به پشت مسلح شده گزارش نمودند، این وابستگی به شکل یک رابطه دوخطی در منحنی‌های $\Delta x/H-s/B_s$ برای تمامی مدل‌ها نمایان می‌شود [7]. در منحنی‌های



شکل ۱۲. روند تغییرات ظرفیت باربری در مقابل طول همپوشانی

Fig. 12. Variation of ultimate bearing pressure versus overlap length of reinforcements

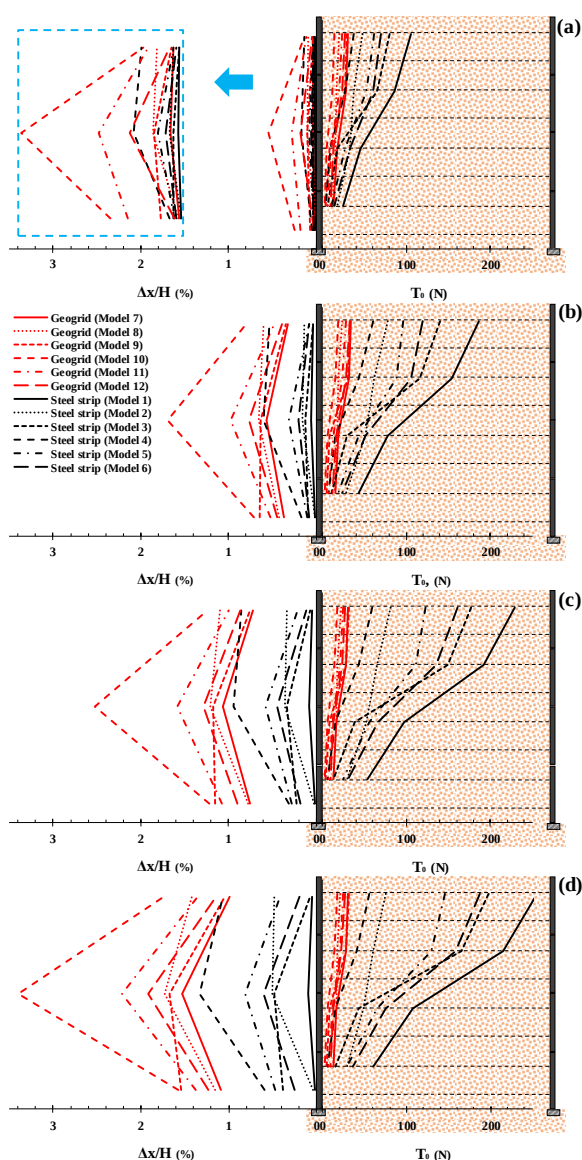


شکل ۱۳. پاسخ جابه‌جایی جانبی دیوار به نشست و فشار تراورس‌ها در سه

ارتفاع مختلف دیوار

Fig. 13. Response of lateral wall displacement versus footing pressure and footing settlement at three different elevations

بارگذاری به سمت دیوار نسبت داد. با توجه به موقعیت قرارگیری بار قائم نسبت به تاج دیوار، محدوده ناحیه پلاستیک با اندکی فاصله از تاج دیوار آغاز و بر اساس میزان عمق نفوذ تنش، با فاصله‌ای از پنجه دیوار به اتمام می‌رسد. بنابراین، همانطور که در تحقیقات پیشین نیز اشاره شده است، بیشترین تأثیر را از این جریان پلاستیک، بخش میانی دیوار می‌گیرد. انعطاف پذیر بودن رویه دیوار نیز سبب می‌شود تا بیشترین تغییر شکل‌ها در بخش میانی دیوار رخ دهد و مُد شکم دادگی به عنوان مُد اصلی تغییر شکل در این دیوارها مطرح شود.



شکل ۱۴. پروفیل تغییر شکل‌های افقی و نیروی بسیج شده در رأس المان‌های

تسلیح در نشست‌های: الف) ۳٪، ب) ۶٪، ج) ۹٪ و د) ۱۲٪.

Fig. 14. Profiles of lateral movement and connection load at different settlements: (a) 3%; (b) 6%; (c) 9%; (d) 12%.

$\Delta x/H-s/B_s$ مشاهده می‌شود که اولین ناحیه خطی با شیب کمتری نسبت به ناحیه دوم تشکیل و تغییر شیب بین دو ناحیه در نشست‌هایی که ظرفیت باربری نهایی شکل می‌گیرد، رخ می‌دهد. شکل (۱۳) نشان می‌دهد که استفاده از المان‌های تسلیح پیوسته، افزایش طول همپوشانی و استفاده از نوارهای فلزی به جای ژئوگریدها، شیب هر دو ناحیه خطی را کاهش می‌دهد. این کاهش در شیب به این معنی است که زمانی که تقویت‌کننده‌های پیوسته و مقادیر L/O بیشتر همراه با افزایش سختی المان‌ها استفاده می‌شود، بخش کوچک‌تری از نشست تراورس به جابه‌جایی جانبی تبدیل می‌شود.

عدم وابستگی جابه‌جایی جانبی دیوار به فشار تراورس دیگر یافته‌ایست که می‌توان از شکل (۱۳) استنباط نمود. همانطور که در منحنی‌های $\Delta x/H-q$ مربوط به دیوارهای مسلح شده با ژئوگرید مشاهده می‌شود، جابه‌جایی جانبی با افزایش فشار تراورس افزایش می‌یابد و این افزایش حتی بعد از زمانی که فشار تراورس به q_u می‌رسد و افت می‌کند، همچنان ادامه می‌یابد. این روند، استقلال جابه‌جایی جانبی دیوار را از فشار ناشی از تراورس‌های واقع بر دیوارهای پشت به پشت تأیید می‌نماید. دلیل این موضوع را می‌توان در شکل‌گیری سطح گسیختگی پس از رسیدن فشار تراورس به q_u و حرکت گوه لغزنده به سوی دیوار دانست. به بیان دیگر، پس از شکل‌گیری گوه لغزنده، این گوه در اثر فشار تراورس‌ها به سمت دیوارهای مقابل رانده شده و جابه‌جایی جانبی آنها را رقم می‌زند، به طوری که این رانده شدن حتی پس از رسیدن فشار تراورس‌ها به مقدار حداکثر و کاهش آن، همچنان ادامه یافته و موجب افزایش جابه‌جایی جانبی دیوارها می‌شود. افزایش جابه‌جایی جانبی دیوارها چه هنگام افزایش فشار تراورس‌ها و چه هنگام کاهش آن، نشان دهنده استقلال جابه‌جایی جانبی از فشار تراورس می‌باشد.

همانطور که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، حداکثر جابه‌جایی در وسط دیوار رخ می‌دهد که ناشی از پررنگتر بودن نرخ رشد جابه‌جایی در این قسمت از دیوار نسبت به نیمه‌های تحتانی و فوقانی دیوار در طول بارگذاری است. این امر اهمیت در نظر گرفتن قسمت میانی دیوارهای پشت به پشت را تحت بارگذاری قائم برجسته می‌سازد و بر تقویت مقاومت خمشی رویه در این قسمت از دیوار تأکید می‌نماید. علت بیشتر بودن تغییر شکل در وسط دیوار را می‌توان به شکل‌گیری جریان پلاستیک از زیر سطح

۱۵ درصد در شکل (۱۵) مقایسه شد. برای هر دو نوع المان تسلیح، $(\Delta x/H)_{\max}$ به شکل غیر خطی با افزایش L_0 کاهش می‌یابد. با این تفاوت که نرخ کاهش $(\Delta x/H)_{\max}$ در مدل‌های مسلح شده با ژئوگرید کمتر از مدل‌های تقویت شده با نوار فلزی بود. این میزان کاهش در نشست‌های مختلف متفاوت بود، اما به ترتیب برای مدل‌های دیوار تقویت شده با ژئوگرید و تسمه فلزی به ترتیب ۶۳ و ۵۶ درصد برآورد شد. با ادامه افزایش طول همپوشانی، این روند کاهش به تدریج کمرنگ شد. این امر نشان می‌دهد که ساخت دیوارهای پشت به پشت با طول همپوشانی بیشتر از یک مقدار معین که تابعی از ویژگی‌های دیوار است، باعث کاهش بیشتر جابجایی دیوار نخواهد شد.

۳-۴- جابه‌جایی قائم خاکریز

نشست و برآمدگی ایجاد شده روی سطح خاکریز ناشی از بارگذاری قائم، تغییر شکل‌های ناخواسته‌ای هستند که می‌توانند بر قابلیت سرویس دهی دیوارهای پشت به پشت تأثیر منفی بگذارند. این بدان معنی است که برای به حداقل رساندن این آثار نامطلوب، لازم است پارامترهای موثر بر تغییر شکل سطح خاکریز دیوارهای پشت به پشت شناسایی شوند. برای این منظور، برآمدگی و نشست ایجاد شده روی سطح خاکریز مدل‌ها در حین بارگذاری با استفاده از چهار LVDT نصب شده در مکان‌های مختلف ثبت و سپس برای تعیین پروفیل‌های تغییر شکل سطح خاکریز در نشست‌های مختلف، مقادیر ثبت شده به عرض تراورس‌ها نرمالیزه شد. پروفیل‌های $\Delta y/B_s$ بدست آمده در شکل (۱۶) ارائه شده‌اند که در آن تغییر شکل رو به بالا (با علامت -) و رو به پایین (با علامت +) سطح خاکریز به ترتیب به عنوان برآمدگی و نشست در نظر گرفته می‌شود.

پروفیل تغییر شکل‌ها نشان داد که تغییر شکل عمودی سطح خاکریز به طور قابل توجهی تحت تأثیر طول همپوشانی، موقعیت المانهای تسلیح پیوسته و نوع المان تسلیح قرار دارد. این تأثیر با افزایش نشست تراورس‌ها برجسته‌تر شد. همانطور که در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود، بالازدگی در سطح خاکریز دیوارهای پشت به پشت تنها زمانی امکان پذیر است که تمام یا بخشی از دیوارهای متقابل با تسمه فلزی به هم متصل شده باشند. جلوگیری از حرکت رو به بیرون دیوار با استفاده از تسمه‌های پیوسته غیر قابل

پروفیل‌های $\Delta x/H$ در شکل (۱۴) نشان می‌دهد که استفاده از المان‌های تسلیح سخت‌تر یک راه حل کارآمد برای کاهش جابه‌جایی‌های افقی دیوارهای متقابل است. اثربخشی این راه حل به آرایش المان‌ها وابسته بود بطوریکه این اثربخشی هنگام استفاده از المان‌های ناپیوسته و همچنین کاهش طول همپوشانی کمرنگ شد. همانطور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود، بیشترین اثربخشی این راه حل مربوط به اتصال کامل دیوارها با کاهش ۸۵ درصدی در جابه‌جایی جانبی است. این اثربخشی با جداسازی نیمه‌های پایین و بالایی دیوارها به ترتیب به ۷۳ و ۶۸ درصد کاهش یافت، اما با جداسازی کامل دیوارها از یکدیگر به حداقل رسید. این بدان معناست که استفاده از المان‌های تسلیح انعطاف ناپذیر برای کاهش جابه‌جایی‌های جانبی در دیوارهایی با المان‌های پیوسته کارآمدتر از دیوارهایی با طول همپوشانی مشخص‌اند.

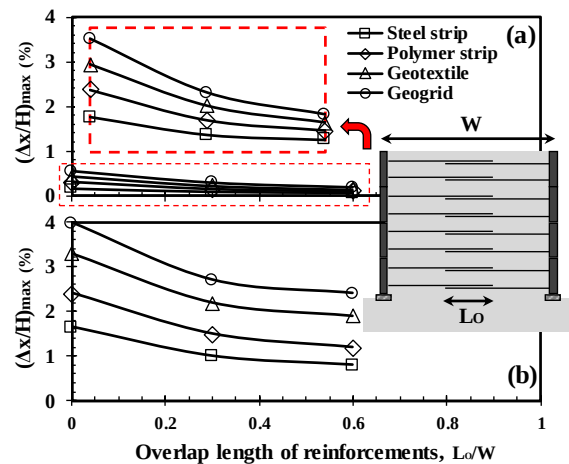
مقایسه پروفیل‌های جابه‌جایی در شکل (۱۴) نشان می‌دهد که اتصال دیوارهای متقابل به یکدیگر با استفاده از المان‌های تسلیح پیوسته می‌تواند به طور موثری جابه‌جایی‌های افقی را در دیوارهای پشت به پشت کاهش دهد. این کاهش جابه‌جایی با استفاده از المان‌های تسلیح پیوسته در تمام ردیف‌ها به حداکثر می‌رسد و در مدل‌های دهم و چهارم به ترتیب ۶۸ درصد و ۹۱ درصد اندازه‌گیری شد. با اتصال موضعی دیوارهای متقابل به یکدیگر، جابه‌جایی کاهش یافت و در دیوارهای مسلح شده با ژئوگرید و نوار فلزی به ترتیب به ۶۲ و ۷۰ درصد رسید. به این معنی که استفاده از المانهای تسلیح پیوسته در برخی ردیف‌ها و اتصال دیوارهای متقابل به صورت موضعی به اندازه اتصال کامل دیوارها در کاهش جابه‌جایی جانبی مؤثر نبود. علاوه بر این، تفاوت بین نرخ کاهش در جابه‌جایی دیوار هنگام استفاده از المانهای پیوسته در مدل‌هایی با المان‌های تسلیح مختلف، نشان‌دهنده نقش برجسته‌تر آرایش اتصال دیوارهای متقابل بر روی جابه‌جایی جانبی هنگام استفاده از المان‌هایی با سختی محوری بیشتر است. این امر اهمیت در نظر گرفتن نوع المان‌های تسلیح را هنگام انتخاب آرایش اتصال دیوارهای متقابل برجسته می‌سازد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش طول همپوشانی راه حل دیگری برای کاهش جابه‌جایی جانبی دیوارهای پشت به پشت بود. برای روشن شدن بیشتر وابستگی جابه‌جایی جانبی دیوار به طول همپوشانی، تغییرات $(\Delta x/H)_{\max}$ در مقابل L_0 در نشست‌های ۳ و

انعطاف و در نتیجه وقوع حالت مقاوم، احتمالاً از دلایل اصلی تشکیل بالازدگی در اطراف تراورس ها می باشد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که استفاده از المان های تسلیح انعطاف پذیر و همچنین جداسازی دیوارها از یکدیگر دو راه حل برای جلوگیری بالازدگی سطح خاکریز اطراف تراورس ها می باشد. از سوی دیگر، استفاده از طول همپوشانی مناسب به عنوان یک راه حل کارآمد برای کاهش نشست در اطراف تراورس ها شناسایی شد. این مقدار برای مدل های مسلح شده با ژئوگرید و نوار فلزی به ترتیب حدود ۳۰٪ و ۲۵٪ برآورد شد که نشان می دهد این راه حل در دیوارهای پشت به پشت تقویت شده توسط ژئوگریدها موثرتر است.

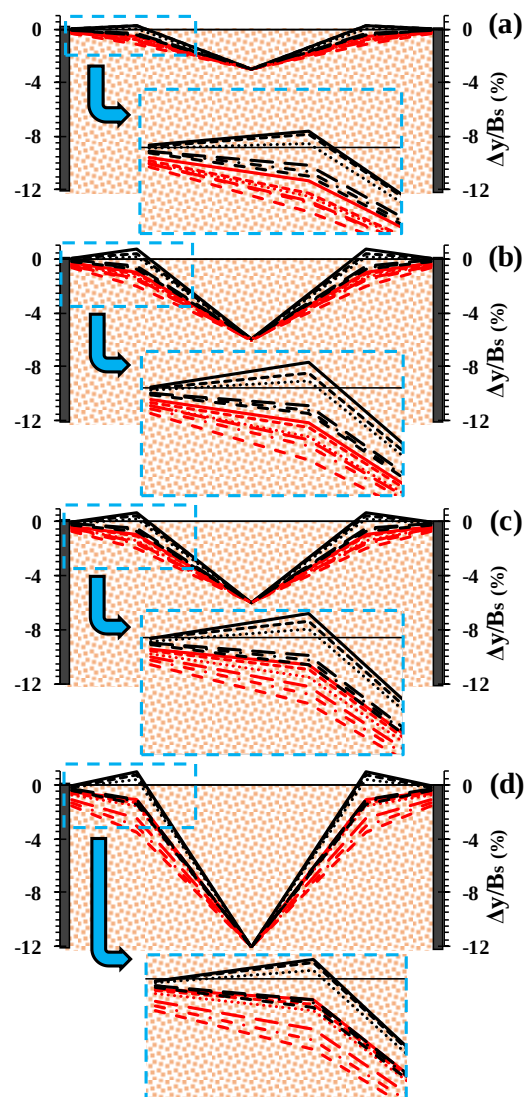
۴-۴- نیروی بسیج شده در رأس المان های تسلیح

تعیین نیروی بسیج شده در محل اتصال المان های تسلیح با رویه (T_0) اولین گام در انتخاب المان تسلیح، طراحی رویه و ارزیابی پایداری دیوار است. بنابراین، شناسایی پارامترهای مؤثر بر نیروی اتصال در دیوارهای خاک مسلح، به ویژه در دیوارهای پشت به پشت که رفتار پیچیده ای از خود نشان می دهند، ضروری است. برای این منظور، نیروی بسیج شده در رأس چهار المان تسلیح در حین بارگذاری با استفاده از نیرو سنج های تعبیه شده بین آنها و رویه اندازه گیری شد. به منظور ارزیابی آثار ترکیبی نوع و آرایش المان تسلیح و همچنین نشست تراورس بر نیروی اتصال، پروفیل های T_0 برای همه مدل ها در چهار مقدار s/B_s در شکل (۱۴) ارائه شده است. وجود یک رابطه معکوس بین مقدار جابه جایی جانبی دیوارها و نیروی بسیج شده در المان های تسلیح، اولین نکته ای است که از مقایسه پروفیل های شکل (۱۳) برداشت می شود. این مقایسه نشان می دهد که با وجود شکل گیری بیشترین نیرو در بخش فوقانی دیوار، جابه جایی جانبی کمی در این بخش مشاهده می شود و این پدیده در بخش میانی بطور کاملاً معکوس نمایان می شود. علت این پدیده را می توان در عملکرد المان های تسلیح جستجو نمود. همانطور که در تحقیقات پیشین نیز اشاره شده است، تغییر شکل ها در یک دیوار خاک مسلح زمانی دچار روند افزایش می شوند که یا المان های تسلیح دچار بیرون کشیدگی شده باشند و یا دچار پارگی (کشیدگی مفرط). وقوع هر یک از این دو پدیده سبب حذف المان تسلیح از ساختار دیوار و کاهش نیروی بسیج شده در آن می شود. بنابراین می توان گفت که در



شکل ۱۵. روند تغییرات تغییر شکل های افقی دیوار با طول همپوشانی المان های تسلیح در نشست های: الف) ۳٪ و ب) ۱۵٪

Fig. 15. Variation of maximum normalized lateral displacement versus overlap length at two different footing settlements: (a) 3%; (b) 15%.



شکل ۱۶. پروفیل تغییر شکل های قائم خاکریز در نشست های: الف) ۳٪، ب) ۶٪، ج) ۹٪ و د) ۱۲٪

Fig. 16. Normalized profiles of backfill surface deformations at different settlements: (a) 3%; (b) 6%; (c) 9%; (d) 12%.

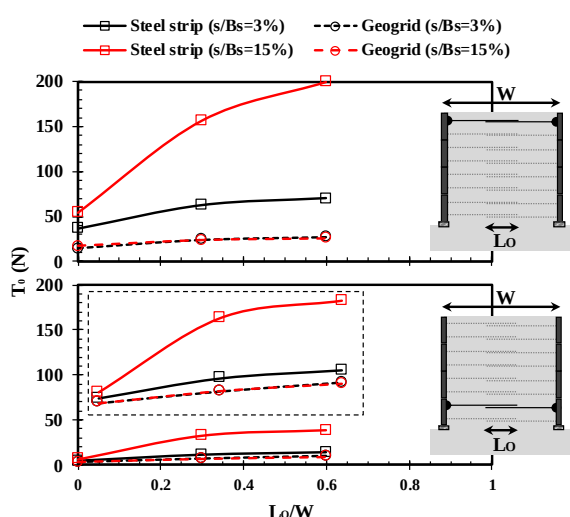
فوقانی و تحتانی المان‌های تسلیح در دو نشست مختلف در شکل (۱۷) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، کاهش نیروی بسیج شده در رأس المان‌های تسلیح با استفاده از المان‌های انعطاف پذیر با افزایش طول همپوشانی برجسته تر می‌شود. این کاهش در المان‌های تحتانی و فوقانی دیوار با طول همپوشانی 0.6W به ترتیب به ۵۲ و ۷۳ درصد رسید.

۵- نتیجه گیری

بر اساس نتایج بدست آمده از این تحقیق، موارد زیر را می‌توان به عنوان یافته‌های اصلی این تحقیق ارائه نمود:

- مقایسه دیوارهای مسلح شده با المان‌های تسلیح مختلف نشان داد که نقش سختی المان تسلیح در بهبود ظرفیت باربری بیشتر از اندرکنش آن با خاک است. بنابراین، برای افزایش ظرفیت باربری باید سختی المان تسلیح به عنوان معیار به منظور انتخاب المان تسلیح مد نظر قرار گیرد.

- مشاهده شد که تأثیر المان‌های تسلیح فوقانی در دیوارهای پشت به پشت برای بهبود ظرفیت باربری بیشتر از المان‌های تسلیح تحتانی است.
- مشخص شد که اگرچه استفاده از المان‌های تسلیح انعطاف پذیر باعث افزایش تغییر شکل‌های جانبی دیوار و کاهش ظرفیت باربری تراورس‌ها می‌شود، اما نقش موثری در کاهش نیروی بسیج شده در المان‌های تسلیح ایفا می‌نماید.



شکل ۱۷. روند تغییرات نیروی اتصال در مقابل طول همپوشانی در نشستهای ۳

و ۱۵ درصد در المانهای ردیف: الف) هشتم، ب) دوم

Fig. 17. Variation of connection load versus overlap length for: (a) 8th reinforcement row; (b) 2th reinforcement row.

دیوارهای خاک مسلح، یک رابطه معکوس بین جابه‌جایی جانبی دیوار و نیروی بسیج شده در المان‌های تسلیح وجود دارد، همانگونه که در شکل (۱۴) نیز مشاهده می‌شود.

وابستگی T_0 به نوع و آرایش المان‌ها و همچنین بسیج حداکثری نیروی در ردیف فوقانی المان‌های تسلیح را می‌توان در شکل (۱۴) مشاهده نمود. پروفیل‌های T_0 نشان می‌دهند که نیروی بسیج شده در رأس المان‌های تسلیح به تدریج با کاهش ارتفاع کاهش می‌یابد. این روند کاهشی به ترتیب برای مدل‌های تقویت شده با تسمه فلزی و ژئوگرید به طور میانگین ۸۰ درصد و ۶۲ درصد برآورد شد که اهمیت ردیف‌های فوقانی المان تسلیح را در دیوارهای پشت به پشت تحت بارگذاری قائم نشان می‌دهد. به حداقل رسیدن نیروی بسیج شده در رأس المان‌های تسلیح در پایین ترین ردیف المانها را می‌توان به عمق مدفون تعبیه شده در جلوی پنجه دیوار نسبت داد که از لغزش دیوار و به دنبال آن بسیج نیرو در المان‌های تحتانی ممانعت می‌نماید. استفاده از المان‌های پیوسته و افزایش طول همپوشانی دو عامل دیگری بود که توزیع غیریکنواخت نیروی بسیج شده در رأس المان‌های تسلیح را در امتداد ارتفاع دیوار به خصوص دیوارهای مسلح شده با تسمه فلزی را رقم زد.

کاهش نیروی بسیج شده در رأس المان هنگام استفاده از المان‌های انعطاف پذیر و کاهش طول همپوشانی و همچنین حداکثر شدن آن هنگام استفاده از المان‌های پیوسته در تمام ردیف‌ها نکته دیگری بود که در پروفیل‌های T_0 مشاهده شد. رشد چشمگیر نیروی بسیج شده در المان‌های تسلیح در اثر اتصال مستقیم دو دیوار متقابل با المانهای پیوسته پیش از این نیز توسط لو و همکاران برای دیوارهای پشت به پشت تحت بار ناشی از خطوط ریلی گزارش شده بود [3]. میزان کاهش نیروی حین استفاده از المان‌های انعطاف پذیر وابسته به آرایش المان‌ها بود به طوری که هنگام استفاده از المان‌های پیوسته مشهودتر می‌شد. این کاهش در ردیف‌های فوقانی محسوس تر بود به طوری که در بالاترین ردیف از المان‌های تسلیح در دیوارهایی با المان‌های کاملاً مجزا به کمترین مقدار برابر با ۶۴ درصد و در دیوارهایی با المان‌های به هم پیوسته بیشترین مقدار برابر ۸۵ درصد رسید. طول همپوشانی نیز بر این کاهش تأثیر گذار بود. برای روشن تر شدن این تأثیر، روند تغییر نیروی اتصال را در برابر طول همپوشانی برای ردیف‌های

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافی در ارتباط با انجام این پژوهش وجود ندارد.

سهم نویسندگان

سهم هر یک از نویسندگان در مقاله با هم برابر است.

منابع مالی

در انجام این تحقیق از منابع مالی مشخصی استفاده نشده است.

بیانیه هوش مصنوعی

نویسندگان اعلام می‌دارند که در تولید، نگارش و تحلیل این مقاله از هیچ‌گونه ابزار یا فناوری هوش مصنوعی استفاده نشده است.

- اتصال مستقیم دو دیوار مقابل به یکدیگر با استفاده از المان‌های تسلیح پیوسته و جداسازی کامل آنها از یکدیگر به ترتیب بهترین و بدترین چیدمان المان‌های تسلیح برای بهبود ظرفیت باربری و همچنین کاهش تغییر شکل دیوار پشت به پشت شناسایی شد. استفاده از این دو چیدمان نیز به ترتیب باعث بسیج بیشترین و کمترین نیرو در المان‌های تسلیح شد.
- مشاهده شد که هنگام استفاده از المان‌های تسلیح پیوسته و افزایش طول همپوشانی، به ویژه در نیمه بالایی دیوار، بخش بیشتری از فشار تراورس به نیروی بسیج شده در المان‌های تسلیح تبدیل می‌شود.

قدردانی نویسندگان

از حمایت‌های آزمایشگاه مطالعات لرزه‌ای دانشگاه قم در راستای انجام این پژوهش قدردانی می‌شود.

References

- [1] FHWA (Federal Highway Administration), 2009. *Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes*. Vols. 1 and 2. FHWA-NHI-10-024. Edited by R. R. Berg, B. R. Christopher and N. C. Samtani. Washington, DC, USA: Federal Highway Administration.
- [2] Chauhan, V.B., Srivastava, A., Jaiswal, S. and Keawsawasvong, S., 2023. Behavior of back-to-back MSE walls: interaction analysis using finite element modeling. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 10(5), pp.888-912.
- [3] Attara, S.K. and Balunaini, U., 2025. Modelling and Analysis of Back-to-Back Mechanically Stabilized Earth Walls under High-Speed Train Dynamic Loading. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 12(5), pp.1-25.
- [4] Lo, S.C.R., Li, S.Q., Gopalan, M. and Gao, Z., 1996. Analysis and design of a tied back-to-back geosynthetic reinforced soil wall. *Journal of Southeast Asian Geotechnical Society*, 27(1), pp.37-50.
- [5] Won, M.-S. and Kim, Y.-S., 2007. Internal deformation behavior of geosynthetic-reinforced soil walls. *Geotextiles and Geomembranes*, 25(1), pp.10-22.
- [6] Kazimierowicz-Frankowska, K., 2005. A case study of a geosynthetic reinforced wall with wrap-around facing. *Geotextiles and Geomembranes*, 23(1), pp.107-115.
- [7] Anubhav, S. and Basudhar, P.K., 2011. Numerical modelling of surface strip footings resting on double-faced wrap-around vertical reinforced soil walls. *Geosynthetics International*, 18(1), pp.21-34.
- [8] Vadavadagi, S.S. and Chawla, S., 2023. Effect of rail axle load on geosynthetic reinforced back-to-back mechanically stabilized earth walls: Experimental and numerical studies. *Transportation Geotechnics*, 38, p.100907.
- [9] Han, J. and Leshchinsky, D., 2010. Analysis of back-to-back mechanically stabilized earth walls. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(3), pp.262-267.
- [10] Zheng, Y., Li, F., Niu, X. and Yang, G., 2023. Numerical investigation of the interaction of back-to-back MSE walls. *Geosynthetics International*, 30(4), pp.382-397.
- [11] Sravanam, S.M., Balunaini, U. and Madhav, M.R., 2019. Behavior and design of back-to-back walls considering compaction and surcharge loads. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 5(4), pp.1-17.
- [12] Sravanam, S.M., Balunaini, U. and Madhira, R.M., 2020. Behavior of connected and unconnected back-to-back walls for bridge approaches. *International Journal of Geomechanics*, 20(7), p.06020013.
- [13] Xu, P., Yang, G., Li, T. and Hatami, K., 2021. Finite element limit analysis of bearing capacity of footing on back-to-back reinforced soil retaining walls. *Transportation Geotechnics*, 30, p.100596.
- [14] Rajagopal, G. and Thiyyakkandi, S., 2022. Effect of reinforcement stiffness on response of back-to-back MSE wall upon infiltration. *Geosynthetics International*, 29(4), pp.409-425.
- [15] Wood, D.M., 2004. *Geotechnical Modelling*. Version 2.2. London: Taylor & Francis Group.

- [16] Goodarzi, S. and Shahnazari, H., 2019. Strength enhancement of geotextile-reinforced carbonate sand. *Geotextiles and Geomembranes*, 47(2), pp.128-139.
- [17] Abdelouhab, A., Dias, D. and Freitag, N., 2010. Physical and analytical modelling of geosynthetic strip pull-out behavior. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(1), pp.44-53.
- [18] Consoli, N.C., Rossi, J.G., Festugato, L., Ruver, C.A., Scheuermann Filho, H.C., Foppa, D., ... and Leon, H.B., 2019. Circular-plate load tests on bounded cemented layers above weak cohesive-frictional soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(10), p.06019011.
- [19] Saha Roy, S. and Deb, K., 2018. Closely spaced rectangular footings on sand over soft clay with geogrid at the interface. *Geosynthetics International*, 25(4), pp.412-426.
- [20] Xu, Y., Yan, G., Williams, D.J., Serati, M., Scheuermann, A. and Vangsness, T., 2020. Experimental and numerical studies of a strip footing on geosynthetic-reinforced sand. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 20(5), pp.267-280.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم؟

Yazdandoust, M. and Daftari, F., 2026. Investigating the performance of back-to-back mechanically stabilized earth walls as railway embankments using physical and numerical modeling. *Modares Civil Engineering journal*, 26(4), pp.47-64.

